

УДК 621.396.96

<sup>1</sup>Ю.А. Авер'янова<sup>2</sup>І.Г. Прокопенко, д-р тех. наук<sup>3</sup>К.І. Прокопенко<sup>4</sup>Ф.Й. Яновський, д-р тех. наук

## АЛГОРИТМИ ВИЯВЛЕННЯ ТУРБУЛЕНТНИХ ЗОН МЕТЕОРОЛОГІЧНИМИ РАДІОЛОКАТОРАМИ

<sup>1,3,4</sup>Інститут інформаційно-діагностичних систем НАУ,<sup>2</sup>Інститут електроніки та систем управління НАУ,e-mail: <sup>1</sup>markovskis@svitonline.com; <sup>4</sup>yanovsky@i.com.ua

*Розглянуто алгоритми радіолокаційного виявлення турбулентних зон у хмарах і опадах. Показано переваги адаптивних алгоритмів на прикладі некогерентних бортових радіолокаторів із використанням експериментальних вимірювань і статистичного моделювання. Підтверджено, що адаптивні алгоритми можна застосовувати в когерентних та доплерівсько-поляриметричних метеорологічних радіолокаторах. Отримані результати є важливими для забезпечення польотів у складних метеорологічних умовах.*

### Вступ

Складні метеоумови значно впливають на безпеку польотів літаків. Одним із найнебезпечніших і найпоширеніших метеорологічних факторів, що впливає на політ літаків, є атмосферна турбулентність. Більшість небезпечних атмосферних турбулентних зон розміщується всередині або поблизу хмар і опадів, які можна виявити за допомогою радіолокаторів [1]. Але це не означає, що в кожній хмарі знаходиться зона небезпечної турбулентності (ЗНТ). Тому не обов'язково уникати попадання в кожну хмару. Швидше за все в хмарі можна знайти достатній для небезпечного прольоту шлях. Для цього необхідно користуватися як метеонавігаційними радіолокаційними системами (РЛС), що є обов'язковим обладнанням сучасних літаків, так і наземними метеорологічними радіолокаторами.

Головний аспект експлуатаційної ефективності бортових радіолокаторів – це їх вірогідність у виявленні турбулентності. Виявлення турбулентності є складним завданням, оскільки відбиваність хмар і опадів буває досить слабка. Завади та шуми суттєво впливають на надійність потрібної інформації. А це може призвести до невеликих відстаней виявлення. Водночас найчастіше методи виявлення турбулентності застосовують для крейсерського польоту з максимальною швидкістю. Крім того, щоб уникнути потрапляння в ЗНТ в контрольованому повітряному просторі необхідно виконати маневр, який потребує обмеженого часу. За цих умов радіолокатори для виявлення турбулентності, які практично використовуються, потребують значної дальності виявлення турбулентності [2]. Сучасні бортові радіолокатори все ще не здатні точно виявляти ЗНТ у хмарах і опадах. Через це потрібна дуже обережна стратегія прийняття рішення для забезпечення достатнього рівня безпеки польотів. Це, в свою чергу, веде до значного зниження регулярності польотів, збільшення часу польоту, непродуктивного витрачання палива та погіршення інших економічних параметрів.

Гідрометеорологічний об'єкт складається із сукупності гідрометеорів (крапель або кристалів льоду), які заповнюють відбивний об'єм та знаходяться в хаотичному русі відносно один одного. Зазвичай статистичні параметри цього руху пов'язані з характеристиками турбулентності атмосфери, але цей зв'язок досить складний. Детальне з'ясування особливостей цього зв'язку, виділення компонентів турбулентності різних просторових масштабів з усієї сукупності факторів, які визначають рух розсіювачів, і дослідження внеску турбулентності в доплерівський спектр радіолокаційного сигналу, відбитий від розсіювачів, виконано в праці [3].

В основу класифікації турбулентності за ступенем її впливу на літаки покладено середньоквадратичну турбулентну швидкість (СТШ)  $\sigma_v$  пульсацій в опромінюваному об'ємі.

Існує низка підходів щодо виявлення турбулентності в хмарах і опадах. Розроблені й знаходять практичне застосування різні алгоритми обробки сигналів, зокрема адаптивні алгоритми [4], нові доплерівсько-поляриметричні підходи до виявлення турбулентності [5]. Тому дуже важливо коректно, з єдиного погляду, з'ясувати можливість різних алгоритмів і намітити напрями їх подальшого розвитку.

**Метою** цієї статті є огляд і порівняльний аналіз адаптивних алгоритмів виявлення радіолокаційних сигналів, відбитих від зон турбулентності, та аналіз перспектив виявлення турбулентності бортовими і наземними метеорологічними радіолокаторами.

### Метеорологічні радіолокатори

Фізичною основою виявлення турбулентних зон в умовах хмарності за допомогою метеорологічних локаторів є зв'язок характеристик сигналу зворотного розсіяння з особливостями мікроструктури та динаміки руху розсіювачів (крапель, кристалів льоду, сніжинок) у роздільному об'ємі або в сукупності роздільних об'ємів.

На практиці та в дослідженнях використовують такі типи радіолокаторів:

- некогерентні;
- когерентні;
- поляризаційні;
- доплерівсько-поляриметричні.

Некогерентні радіолокатори вимірюють лише характеристики потужності відбитого сигналу, які пов'язані з радіолокаційною відбиваністю. Статистичний зв'язок між радіолокаційною відбиваністю хмар і опадів і СТШ пульсацій в них використовується для оцінки небезпечності метеооб'єктів для авіації вже кілька десятиліть. Природа цього зв'язку полягає в тому, що як висхідні та низхідні потоки, так і турбулентність сприяють зростанню крапель та збільшенню концентрації великих крапель. Це зумовлює зростання відбиваності, яка є шостим початковим моментом розподілу крапель за розмірами [1]. Як наслідок, збільшується потужність прийнятого сигналу. Амплітудні методи локалізації ЗНТ базуються на вимірюванні радіолокаційної відбиваності. Вони використовують осереднені значення амплітуд сигналів [1].

Когерентні радіолокатори вимірюють параметри доплерівського спектра відбитого сигналу. Теорію, яка пов'язує характеристики обвідної послідовності імпульсів, відбитих від метеоцілі, з рухом розсіювачів та основи методики зондування метеооб'єктів наземними метеорологічними РЛС з отриманням інформації про динамічні та мікрофізичні параметри хмар і опадів, було розроблено на початку шестидесятих років [6; 7]. Важливо, що ширину доплерівського спектра можна оцінити за допомогою спеціальної обробки сигналу і в некогерентних радіолокаторах [7].

Засоби зондування метеооб'єктів та обробки сигналів некогерентних і доплерівських РЛС, які використовують характеристики доплерівського спектра, запроваджено в практику радіолокаційної метеорології. Це знайшло відображення в багатьох публікаціях [7–10]. Аналіз особливостей використання бортової і наземної метеорологічних РЛС для оцінки параметрів доплерівського спектра, впливу сканування, вібрацій і форми діаграми направленості антени при русі літака на розширення доплерівського спектра виконано в працях [11; 12]. Аналіз зв'язку характеристик доплерівського спектра з небезпечними метеорологічними явищами викладено в працях [10; 13–15].

Поляризаційні радіолокатори вимірюють поляризаційні характеристики, які є чутливими до форми і орієнтації розсіювачів [10].

Доплерівсько-поляриметричні радіолокатори одночасно використовують спектральні та поляриметричні характеристики. Вони здатні збільшити інформаційні можливості метеорологічних радіолокаторів [2; 5; 15; 16].

### Евристичні алгоритми

Турбулентні вихорі захоплюють радіолокаційні розсіювачі в свій рух, тому турбулентність викликає збільшення дисперсії швидкості гідрометеорів в розсіювальному об'ємі [11; 12]. Це, в свою чергу, веде до розширення доплерівського спектра, який залежить від розподілу радіальних швидкостей гідрометеорів, зваженого на їх відбиваність і функцію форми роздільного об'єму [10].

Три обставини знижують ступінь зв'язку між інтенсивністю турбулентності і шириною доплерівського спектра та ускладнюють інтерпретацію результатів експерименту. По-перше, захоплення крапель повітряними вихорами не є повним. По-друге, на рух крапель впливає не тільки турбулентність, а й деякі інші фактори. По-третє, розподіл відбивальних частинок за їх ефективною площею розсіювання наперед невідомий.

Отже, зв'язок характеристик доплерівського спектра з турбулентністю – статистичний.

Ширина спектра флуктуацій сигналу некогерентного радіолокатора однозначно зв'язана з шириною доплерівського спектра, якщо виконуються умови Котельнікова–Найквіста [12]. Отже, вона також містить інформацію про турбулентність.

Крім того, ширина доплерівського спектра обернено залежить від коефіцієнта міжперіодної кореляції сигналу. Це дозволяє використовувати кореляційні характеристики сигналу в наземних і бортових метеорологічних радіолокаторах [10; 11]. Ідея використання кореляційних параметрів послідовності відбитих імпульсів для виявлення турбулентності знайшла досить широке застосування в наземних і бортових метеорологічних радіолокаторах, зокрема, у вигляді вимірювання інтервалу кореляції або коефіцієнта кореляції [10; 11].

Запропонований комплексний алгоритм сукупного використання амплітудного і кореляційного параметрів для збільшення ймовірності локалізації ЗНТ передбачає вимірювання параметрів і формування дискримінантної функції, яка залежить від параметрів обох груп. Інший комплексний алгоритм, який передбачає вимірювання обвідної відбитого сигналу, а також її похідної, запропоновано в праці [17].

Алгоритм, відомий як пульс-парний, широко використовують у метеорологічних радіолокаторах [8; 10; 18]. Він полягає в оцінці коефіцієнта міжперіодної кореляції і перевірці її на поріг.

Для оцінки кореляції від імпульсу до імпульсу використовують різні алгоритми [10], найпрозоріший з яких обчислює кореляційний коефіцієнт:

$$r^* = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} x_i x_{i+1} - \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}. \quad (1)$$

Алгоритм виявлення турбулентної зони реалізується за допомогою порівняння статистики (1) з порогом рішення  $V_p$ .

Відбитий радіолокаційний сигнал є корельованим випадковим процесом. Коефіцієнт кореляції між двома послідовними імпульсами, відбитими від одного одиночного радіолокаційного об'єкту, є функцією інтенсивності турбулентності  $r = r(\sigma_V)$ , де  $\sigma_V$  – середньоквадратичне значення доплерівської швидкості як параметра інтенсивності турбулентності. Чим вища інтенсивність турбулентності, тим менше значення коефіцієнта кореляції. Це особливо зрозуміло за відсутності шуму. Ситуація змінюється, коли діє адитивна суміш корельованого сигналу і некорельованого шуму, яка характеризується коефіцієнтом кореляції:

$$r_\Sigma = r\gamma / (1 + \gamma), \quad (2)$$

де  $\gamma = k_R \sigma_V^2 / \sigma_n^2$  – відношення сигнал–шум;  $k_R$  – коефіцієнт, який залежить від характеристик радіолокатора.

Підставивши модель коефіцієнта кореляції [6]

$$r = 1 - \frac{8\pi^2 T_s^2}{\lambda^2} \sigma_V^2 = 1 - C_R \sigma_V^2,$$

де  $T_s$  – період повторення імпульсів,  $\lambda$  – довжина хвилі, в рівняння (2), можна побачити, що коефіцієнт кореляції стає немонотонною функцією, максимальна величина якої дорівнює

$$\sigma_V^2 = \sigma_{V_0}^2 - \frac{C_R k_R \sigma_n^2 + \sqrt{(C_R k_R \sigma_n^2)^2 + C_R k_R^2 \sigma_n^2}}{C_R k_R^2},$$

що відповідає відношенню сигнал–шум:

$$\gamma_0 = -1 + \sqrt{1 + \frac{1}{C_R \sigma_n^2}}. \quad (3)$$

Починаючи з наведеного у формулі (3) значення  $\gamma_0$ , коефіцієнт кореляції зменшується зі збільшенням  $\sigma_V$ . На рис. 1 показано залежність коефіцієнта кореляції суміші сигналу з шумом від  $\sigma_V$  за різних значень потужності шуму  $\sigma_n$  для  $T_s = 0,001$  та  $\lambda = 0,03$  м.

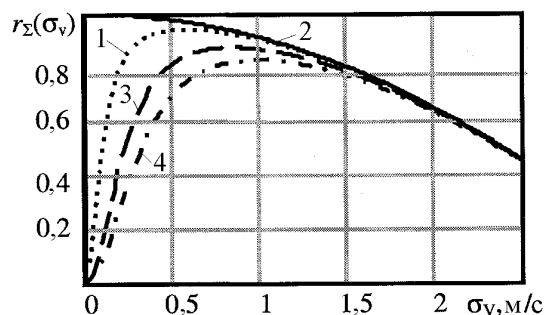


Рис. 1. Залежність коефіцієнта кореляції суміші від  $\sigma_V$ :

1 –  $\sigma_n = 0,01$ ; 2 –  $\sigma_n = 0$ ; 3 –  $\sigma_n = 0,05$ ; 4 –  $\sigma_n = 0,1$

Таким чином, алгоритм виявлення турбулентності, який вимірює коефіцієнт кореляції суміші сигналу та завади, потрібно використовувати тільки у разі вимірювань з відношенням сигнал – шум більшим за мінімальне значення, яке визначено формулою (3). Фактично пульс-парний алгоритм виявляє зменшення коефіцієнта кореляції сигналу. Некорельований шум може призвести до значної декореляції прийнятого сигналу. Це означає, що необхідно зменшити поріг виявлення, який сприяє значному зменшенню ефективності пульс-парного алгоритму, у разі невеликого відношення сигнал – шум. Це веде до зменшення дальності виявлення турбулентності.

Пульс-парний алгоритм у будь-якій версії стає непридатним за дуже малих значень ширини спектра або у разі малих відношень сигнал – шум.

Відомі алгоритми радіолокаційного виявлення турбулентних зон у хмарах використовують чітко виражені фізичні принципи. Алгоритми сконструйовано із застосуванням вимірювальних алгоритмів конкретних інформативних параметрів сигналів (потужності, ширини спектра, інтервалу кореляції, коефіцієнта кореляції та ін.). Одним з істотних факторів, що часто обмежує імовірність виявлення турбулентності (ІВТ) за допомогою відомих алгоритмів, є недостатній обсяг вибірки сигналу для одержання обґрунтованих оцінок інформативних параметрів. Статистичні характеристики вибірових оцінок суттєво залежать від обсягу вибірки. Крім того, на вірогідність одержаної інформації істотний вплив справляють шуми і завади, характеристики яких можуть змінюватися протягом часу. Отже, алгоритми, побудовані на базі фізичних процесів, в реальних ситуаціях не завжди бувають задовільними. Проте під час розроблення алгоритмів виявлення турбулентних зон нас цікавлять не так фізичні процеси, як характер статистичних залежностей між параметрами сигналу і характеристиками об'єкта.

### Параметричний алгоритм

Задачу виявлення ЗНТ можна сформулювати як задачу перевірки параметричної гіпотези  $H_0$ :

$$\sigma = \sigma_0; \quad r = r_0,$$

Проти параметричної альтернативи  $H_1$ :

$$\sigma = \sigma_1; \quad r = r_1.$$

Структуру розв'язувального правила визначають логарифмом відношення правдоподібності для конкуруючих гіпотез:

$$\lambda(x_1, \dots, x_n) = \ln \left[ \frac{\omega_1(x_1, \dots, x_n; \sigma_1, r_1)}{\omega_0(x_1, \dots, x_n; \sigma_0, r_0)} \right],$$

де  $\omega_1(x_1, \dots, x_n; \sigma_1, r_1)$  – багатовимірна щільність імовірності вибірки  $x_1, \dots, x_n$  при гіпотезі  $H_1$  наявності ЗНТ;  $\omega_0(x_1, \dots, x_n, \sigma_0, r_0)$  – багатовимірна щільність імовірності вибірки  $x_1, \dots, x_n$  при гіпотезі відсутності ЗНТ  $H_0$ .

За такої постановки в праці [14] одержано алгоритм:

$$\lambda(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=2}^{n-1} C_1 x_i^2 + C_2 x_{i-1}^2 + C_3 x_i x_{i+1} > V_p, \quad (4)$$

де  $V_p$  – поріг рішення.

Числові значення коефіцієнтів  $C_i (i=1,3)$  в алгоритмі (8) визначають за виразами:

$$C_1 = Gr_0^2 - Qr_1^2; \quad C_2 = G - Q;$$

$$C_3 = 2(Qr_1 - Gr_0); \quad G = 2\sigma_1^2(1 - r_1^2);$$

$$Q = 2\sigma_0^2(1 - r_0^2).$$

Враховуючи класифікацію турбулентності за середньоквадратичною швидкістю пульсацій [17], зони із середньоквадратичною швидкістю пульсацій  $\sigma_v < 2$  м/с вважаємо безпечними. Для них відповідно до моделі

$$B(\tau) = \sigma^2 e^{-\beta|\tau|} \cos w_0 \tau,$$

коефіцієнт міжперіодної кореляції  $r \geq 0,94$  [18; 19]. Зони із СТШ пульсацій  $\sigma_v > 4,5$  м/с характеризуються значенням  $r < 0,675$ . Співвідношення середньоквадратичних відхилень вхідного сигналу для гіпотез  $H_0$  та  $H_1$  буде таким:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_0} = \frac{4,5}{2} = 2,25.$$

З урахуванням згаданої класифікації турбулентних зон на безпечні та небезпечні значення коефіцієнтів

$$C_1 = 41; \quad C_2 = 44,4; \quad C_3 = -84,26$$

конкретизують алгоритм (4) для прийнятих вхідних даних.

### Одновибірковий алгоритм

Якщо відбиваність хмари однакова, потужність відбитого сигналу залежить від відстані до відбивного об'єму. У зв'язку з цим для забезпечення постійності ймовірності хибної тривоги поріг рішення  $V_p$  в параметричному алгоритмі (4) треба змінювати відповідно дальності. Інше розв'язання проблеми стабілізації ймовірності хибної тривоги полягає у використанні різних автоматичних регулювань, підсилювачів проміжної частоти з логарифмічною амплітудною характеристикою та ін. В області ймовірнісного прийняття рішень отримано великий досвід, головним чином, евристичних розв'язань.

Алгоритм виявлення інваріантний до потужності сигналів синтезується з відношення правдоподібності [18; 19]:

$$\lambda(x_1, \dots, x_n) = \frac{\int_0^\infty \omega_1(x_1, \dots, x_n, \psi, r_1) d\psi}{\int_0^\infty \omega_0(x_1, \dots, x_n, \psi, r_0) d\psi}, \quad (5)$$

де  $\psi = \sigma^2$  – параметр масштабу або потужності сигналу.

Після підстановки виразу для інтегрування і тотожних перетворень маємо статистику [19]:

$$\lambda(x_1, \dots, x_n) = \frac{(1 + r_0) \sum_{i=1}^n x_i^2 - 2r_0 \sum_{i=2}^n x_i x_{i-1}}{2(1 - r_1^2) \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{r_1}{(1 - r_1^2)} \sum_{i=2}^n x_i x_{i-1}} > V_p. \quad (6)$$

Статистика (6) є монотонною за змінною

$$\zeta = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{\sum_{i=2}^n x_i x_{i-1}}.$$

Розв'язувальне правило (6) еквівалентно правилу:

$$\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{\sum_{i=2}^n x_i x_{i-1}} > V'_p. \quad (7)$$

яке реалізується ще простіше. Алгоритми (6) і (7) є інваріантними до потужності шумів.

### Двовибірковий алгоритм

Інваріантний одновибірковий алгоритм (7) реагує тільки на зміну коефіцієнта кореляції. Отже, він не повністю використовує інформацію, яка міститься в сигналі, відбитому від турбулентної зони. Повніше використовувати інформацію про фонову заваду від земної поверхні або від інших нерухомих розсіювачів, що попадають в роздільний об'єм можна застосовуючи двовибіркове вирішальне правило. Такий алгоритм використовує дві вибірки – сигнальну  $x_1, \dots, x_n$ , яка може нести інформацію про наявність турбулентної зони, та навчальну  $y_1, \dots, y_n$ , в якій є тільки сигнал від фону.

Гіпотеза  $H_0$  полягає в тому, що сигнальна і навчальна вибірки належать до одного самого розподілу [18] з невідомою дисперсією  $\sigma^2$  та коефіцієнтом кореляції  $r = r_0$ . Гіпотеза  $H_1$  полягає в тому, що сигнальна вибірка  $x_1, \dots, x_n$  нале-

жить до розподілу з дисперсією  $\sigma_c^2 = \sigma^2(1 + \gamma)$  та коефіцієнтом кореляції  $r = r_1 < r_0$ .

Коефіцієнт  $\gamma \geq 0$  визначає зміну параметра розподілу при гіпотезах  $H_0$  та  $H_1$ .

Структуру адаптивного двовибіркового розв'язувального правила визначають за узагальненим емпіричним байєсовим методом співвідношенням

$$\lambda(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_n) = \frac{\int_0^\infty \omega_1(x_1, \dots, x_n, \psi, r_1) \omega_0(y_1, \dots, y_n, \psi, r_0) d\psi}{\int_0^\infty \omega_0(x_1, \dots, x_n, \psi, r_0) \omega_0(y_1, \dots, y_n, \psi, r_0) d\psi}, \quad (8)$$

де  $\psi = \sigma^2$  – параметр масштабу або потужність відбитого сигналу.

Згідно з процесами [18; 19], двовибірковий алгоритм використовує статистику:

$$\lambda(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_n) = \frac{(1+r_0) \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) - 2r_0 \left( \sum_{i=2}^n x_i x_{i-1} + \sum_{i=2}^n y_i y_{i-1} \right)}{C_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + C_2 \sum_{i=1}^n y_i^2 + C_3 \sum_{i=2}^n x_i x_{i-1} + C_4 \sum_{i=2}^n y_i y_{i-1}}.$$

де

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{1+r_1}{2(1-r_1^2)(1+b)}; \\ C_2 &= \frac{1+r_0}{2(1-r_0^2)}; \\ C_3 &= -\frac{r_1}{(1-r_1^2)(1+b)}; \\ C_4 &= \frac{r_0}{(1-r_0^2)}. \end{aligned}$$

Алгоритм виявлення турбулентних зон визначають порівнянням величини статистики  $\lambda(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_n)$  з порогом рішення  $V_p$  відповідно до виразу (9).

### Порівняльний аналіз

Відбиття від турбулентних зон є вузькосмуговим випадковим процесом з амплітудою  $U(t)$ , розподіленою за законом Релея. Флуктуації амплітуди задаються дисперсією гауссівського процесу на вході детектора за формулою

$$\sigma_u^2 = k\sigma_v^2 \quad (10)$$

і міжперіодним коефіцієнтом кореляції:

$$|r| \approx 1 - \frac{8\pi^2 T_s^2 \sigma_v^2}{\lambda^2}. \quad (11)$$

На вході детектора в  $i$ -ту у мить часу маємо обвідну адитивної суміші шуму приймача та відбиттів від турбулентної зони:

$$x(t_i) = U(t_i) \cos(\omega_0 t_i + \varphi) + \eta_i, \quad (12)$$

де  $\omega_0$  – несуча частота;  $\eta_i$  – відліки гауссівського некорельованого шуму.

Обвідна процесу (12) також розподілена за законом Релея. Обвідна відбитого сигналу моделюється згідно з таким алгоритмом [19]:

$$\begin{aligned} x_i &= \sqrt{(\eta_{1i} + A(t_i))^2 + (\eta_{2i} + B(t_i))^2}, \\ i &= 1, \dots, n \end{aligned} \quad (13)$$

де  $\eta_{1i}, \eta_{2i}$  – гауссівські некорельовані числа з нульовим математичним сподіванням і дисперсією, яка дорівнює дисперсії внутрішньоприймачевого шуму;  $A(t_i)$ ,  $B(t_i)$  – квадратурні складові відбитого сигналу, які являють собою гауссівські процеси з незалежними в збіжні моменти часу значеннями, що мають нульове математичне сподівання та дисперсію, що визначається виразом (11). Коефіцієнт кореляції між сусідніми відліками квадратурних складових залежить від СТШ пульсацій та задається формулою (10). Формування послідовності  $A(t_i)$ ,  $B(t_i)$ ,  $i = 1, \dots, n$  з коефіцієнтом кореляції  $r$  досягається за допомогою експоненціального згладжування:

$$\begin{aligned} A(t_i) &= rA(t_{i-1}) + \sqrt{(1-r^2)} \eta_i \cos \varphi_i; \\ B(t_i) &= rB(t_{i-1}) + \sqrt{(1-r^2)} \eta_i \sin \varphi_i, \end{aligned} \quad (14)$$

де  $\eta_i$  – послідовність гауссівських незалежних чисел з нульовим математичним сподіванням і дисперсією  $M_r \{\eta\} = k\sigma_v^2$ ;  $\varphi_i$  – випадкова фаза, розподілена рівномірно в проміжку  $0 \dots 2\pi$ .

Для побудови характеристик виявлення турбулентних зон використовувалася моделювальна програма, яка містить блок генерації вибірок сигналів, відбитих від турбулентних зон (12) – (14), а також алгоритм, який базується на безпосередньому обчислюванні вибіркового коефіцієнта міжперіодної кореляції.

Наведені характеристики виявлення турбулентних зон мають такі обсяги вибірки:  $N = 8, 16, 32, 64, 128$ . Поріг рішення підібрано, виходячи з таких значень імовірності хибної тривоги:  $F = 0,1; 0,01; 0,001$ . Характеристики виявлення турбулентних зон обчислювалися методом Монте-Карло. Обсяг випробовувань при побудові кожної точки становив 10 000.

На рис. 2 наведені характеристики виявлення турбулентних зон.

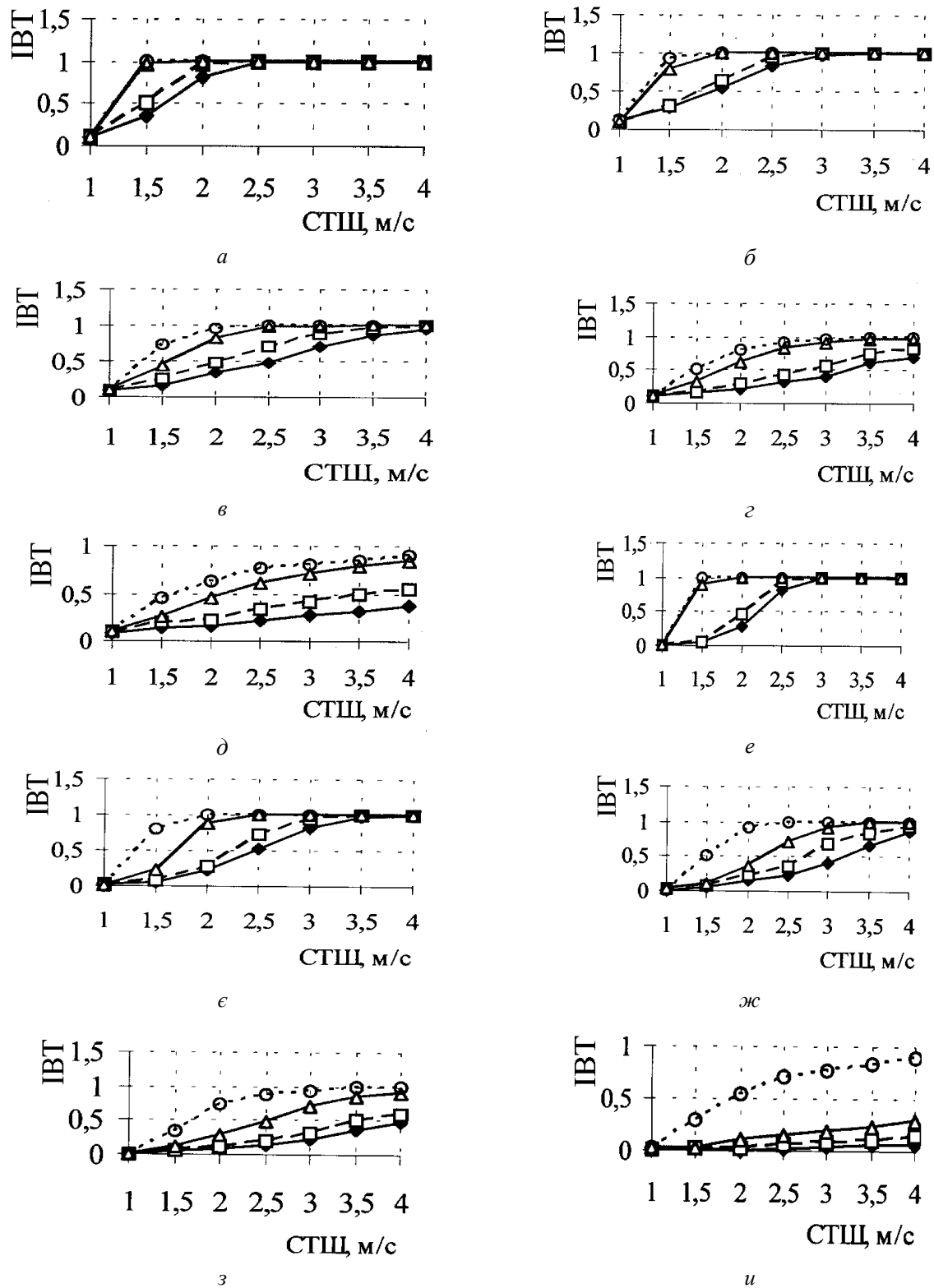


Рис. 2. Імовірність виявлення турбулентних зон як функція  $\sigma_v$ :

*a* –  $F = 0,1; N=128$ ; *б* –  $F = 0,1; N=64$ ; *в* –  $F = 0,1; N=32$ ; *г* –  $F = 0,1; N=16$ ; *д* –  $F = 0,1; N=8$ ; *е* –  $F = 0,01; N=12$ ; *ж* –  $F = 0,01; N=64$ ; *з* –  $F = 0,01; N=32$ ; *и* –  $F = 0,01; N=16$ ; *у* –  $F = 0,01; N=8$ ;

за алгоритмом (1);                      за алгоритмом (4);                      за алгоритмом (6);                      за алгоритмом (8)

Побудовані криві залежностей імовірностей правильного виявлення  $D$  від інтенсивності турбулентності  $\sigma_v$  дозволяють порівняти ефективність адаптивних (6), (9), параметричного (4) та пульс-парного (1) алгоритмів виявлення турбулентних зон. Розрахунки зроблено для різних обсягів вибірки  $N$  та ймовірностей хибної тривоги  $F$ .

Залежності ймовірностей правильного виявлення турбулентності заданої інтенсивності від обсягу вибірки  $N$  за постійної ймовірності хибної тривоги  $F = 0,1$  показано на рис. 3.

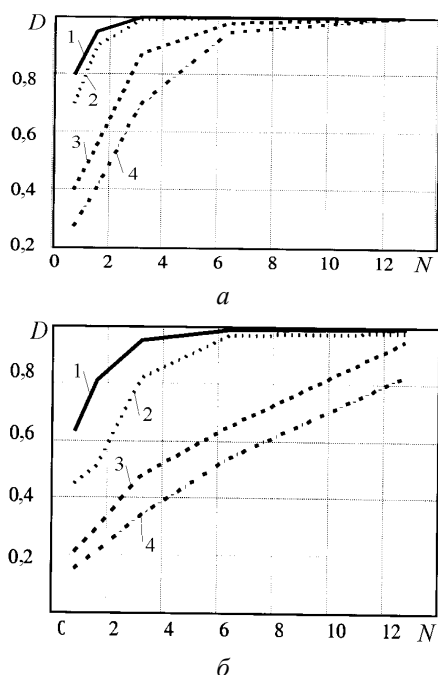


Рис. 3. Імовірність виявлення турбулентних зон як функція обсягу вибірки  $N$ :  
 $a - \sigma_v = 3$  м/с;  $b - \sigma_v = 2$  м/с;  
 1 – за алгоритмом (5); 2 – за алгоритмом (8);  
 3 – за алгоритмом (11); 4 – за алгоритмом (1)

Результати досліджень показують, що найбільшою ефективністю характеризується параметричний алгоритм (5), найближчий до нього – адаптивний двовибірковий алгоритм (11), за ними – адаптивний алгоритм (8).

### Перспективи подальшого розвитку

Аналіз адаптивних алгоритмів виявлення турбулентності показує, що їх майже без змін можна використовувати як у некогерентних, так і в когерентних метеорологічних радіолокаторах. Водночас для доплерівських радіолокаторів можна розробити також алгоритми з урахуванням середньої доплерівської швидкості у відбивних об'єктах.

Останнім часом бурхливого розвитку набувають доплерівсько-поляриметричні методи дослідження хмар і опадів. Зокрема, в праці [5] наве-

дено результати міжнародного проекту про доплерівсько-поляриметричні радіолокаційні спостереження турбулентності в дощі, виконаного в Делфті (Нідерланди) у рамках довгострокового співробітництва між Національним авіаційним університетом і Міжнародним дослідницьким центром телекомунікацій та радіолокації Делфтського технічного університету. Дані радіолокаційних спостережень дощу проаналізовано з метою підтвердити або спростувати теоретичне передбачення, що впливає зі спільних досліджень 1997–1999 рр., про зв'язок між інтенсивністю турбулентності в дощі та спектральною диференційною відбиваністю (СДВ)  $sZdr$  – новою вимірюваною величиною, яку було розроблено і введено в практику дистанційного зондування атмосфери у IRCTR [21].

Експериментальні дані були здобуті за допомогою радіолокаційної системи  $S$ -діапазону TARA ( $\lambda \approx 9$  см) на полігоні, розташованому в центральній частині Нідерландів.

За результатами статистичного аналізу обробки моделювання та порівняння даних вимірювань і розрахунків установлено, що СДВ і, зокрема її параметр – нахил лінійної апроксимації кривої СДВ (slope  $sZdr$ ) – дійсно зв'язані з інтенсивністю турбулентності в тому ж радіолокаційному роздільному об'ємі. Накопичені результати одночасних вимірювань SLP (slope  $sZdr$ ) та вкладу турбулентності  $\sigma_T$  у доплерівський спектр з 13 часових шарів з 90 елементів дальності, тобто 1170 точок показано на рис. 4.

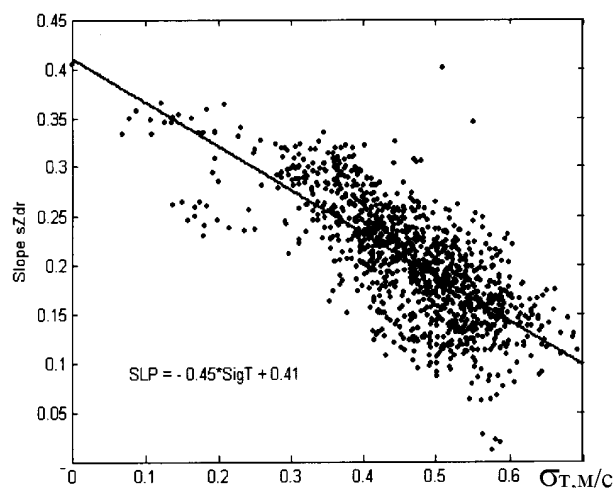


Рис. 4. Негативна кореляція між нахилом спектральної диференційної відбиваності та інтенсивністю турбулентності

Лінійну апроксимацію залежності між турбулентністю і SLP за методом найменших квадратів виражено формулою

$$SLP = -0,45\sigma_T + 0,41.$$

Осереднені значення  $SLP$  і  $\sigma_T$  негативно корельовані між собою, тобто чим більша інтенсивність турбулентності, тим менше  $SLP$ .

Поєднання теорії адаптивного статистичного синтезу з новими даними про зв'язок доплерівсько-поляриметричних вимірюваних параметрів з турбулентністю може лягти в основу розроблення нових алгоритмів радіолокаційного виявлення турбулентності.

Синтез адаптивних алгоритмів – ваговий крок порівняно із суто евристичним та параметричним підходами. Але проблема адекватності вихідних моделей залишається актуальною і в цьому разі. З погляду вдосконалення методики синтезу подальший напрям дослідження – це синтез непараметричних алгоритмів виявлення сигналів від турбулентних зон. Одним із зразків непараметричного підходу є застосування потенційних функцій для розроблення алгоритму виявлення граду [22].

Таким чином, існують досить визначені можливості подальшого розвитку метеорологічних радіолокаторів (бортових і наземних) в частині розроблення і застосування алгоритмів виявлення турбулентності.

На підставі виконаного аналізу доцільно розробити технічні пропозиції для використання нових алгоритмів обробки сигналів в бортових і наземних некогерентних, когерентних і доплерівсько-поляриметричних метеорологічних радіолокаторах.

### Висновки

Існуючі методи та прилади для виявлення зон небезпечної атмосферної турбулентності недостатньо ефективні. Причина цього полягає в неповному використанні інформації, що міститься у відбитому сигналі.

Для оцінки ефективності алгоритмів виявлення турбулентності в роботі використовується метод Монте-Карло.

Пульс-парний алгоритм оснований на непараметричному оцінюванні міжперіодного коефіцієнта кореляції обвідної сигналу. Він не враховує амплітудні характеристики відбитого сигналу.

Для реалізації пульс-парного алгоритму вимірюваний на практиці коефіцієнт кореляції вибірки не є оптимальною оцінкою коефіцієнта кореляції обвідної суміші сигналу та прийнятої завади. Широке вживання такої оцінки, головним чином, пояснюється традицією й евристичним походженням пульс-парного алгоритму.

Параметричний алгоритм, який ураховує всю відому статистичну інформацію, дає найкращі результати, якщо застосована при синтезі модель адекватна. Але в реальній ситуації не можна гарантувати, що використана модель завжди виправдовується. Цей алгоритм служить еталоном для порівняння ефективності різних алгоритмів.

Алгоритм, що є інваріантним до потужності шуму, по суті використовує ширину спектра сигналу як інформативний параметр. З цієї точки зору він найбільш близький до пульс-парного алгоритму, але завдяки оптимізації дає кращі результати зі зменшенням відношення сигнал–шум.

Адаптивний двовибірковий алгоритм ураховує два параметри: потужність відбитого сигналу та коефіцієнт кореляції. Він використовує оптимальне оцінювання. Тому ефективність цього алгоритму вища за ефективність неоптимального пульс-парного алгоритму.

Важливою задачею аналізу було порівняння всіх алгоритмів у випадку, коли реальні характеристики сигналу відрізняються від прийнятих в синтезі моделей. Аналіз було зроблено за таких умов:

- використовувалися різні рівні сигналу – шуму, включаючи ті випадки, коли умови для високих значень сигналу – шуму не виконувались;
- замість релєвського розподілу, прийнятого при синтезі, для аналізу використовувався також і експонентний розподіл амплітуд;
- потужність відбитого сигналу вважалась незалежною від інтенсивності турбулентності.

Отже, моделювалися ситуації, коли не працює характеристика потужності, як було прийнято при синтезі. Переваги адаптивного двовибіркового алгоритму особливо помітні за низьких рівнів сигналу – шуму, оскільки тут пульс-парний алгоритм виявляє зменшення коефіцієнта кореляції, а некорельований шум призводить до значної декореляції прийнятого сигналу. Це означає необхідність зменшення порогу виявлення для забезпечення такого самого рівня ймовірності прийняття хибних рішень.

Отже, ефективність пульс-парного алгоритму різко знижується, якщо відношення сигнал – шум менше за 10 дБ. Подібне трапляється в алгоритмах селекції рухомих цілей, які ефективні тільки у разі великого відношення сигнал – шум.

Адаптивні алгоритми забезпечують високу ефективність порівняно з відомими алгоритмами, які вже використовуються в метеорологічних радіолокаторах. Це особливо виражено при обмежених вибірках сигналу, що характерно для практичних ситуацій.

Простота технічної реалізації, висока потенційна ефективність і поліпшена завадостійкість синтезованих алгоритмів уможлиблює їх широке застосування в сучасних бортових та наземних метеорологічних радіолокаторах. Це стосується як некогерентних, так і доплерівських радіолокаторів.

Подальша універсалізація алгоритмів виявлення турбулентності пов'язана із синтезом непараметричних алгоритмів, а виявлення нових зв'язків відбитого сигналу з характеристиками інтенсивності турбулентності, зокрема в доплерівсько-поляриметричних радіолокаторах, відкриває нові обставини для оптимального статистичного синтезу.



## Список літератури

1. Яновский Ф.И. Бортовые метеонавигационные радиолокаторы. – К.: КИИГА, 1982. – 82 с.
2. Brangi V.N., Chandrasecar V. Polarimetric Doppler Weather Radar. – Cambridge Univ. Press, 2002. – 635 p.
3. Atlas D. Advances in radar meteorology // Adv. in Geophys. – 1964. – 10. – P. 317–478.
4. Прокопенко И.Г., Яновский Ф.И., Лизхарт Л.П., Прокопенко К.И. Синтез и анализ эффективности инвариантных алгоритмов обработки сигналов от турбулентных зон в метеонавигационных радиолокационных станциях // Вісн. КМУЦА. – 1999. – №2. – С. 154–159.
5. Yanovsky F.J., Unal C.M.H., Russchenberg W.J. Doppler-Polarimetric Radar Observations of Turbulence in Rain // Report: IRCTR-S-006-03 (Sept. 2002 – Mar. 2003), TU-Delft. – The Netherlands. – 2003. – P. 102.
6. Горелик А.Г., Мельничук Ю.В., Черников А.А. Связь статистических характеристик радиолокационного сигнала с динамическими характеристиками и микроструктурой метеорообъекта // Тр. ЦАО. – 1963. – Вып. 48. – С. 3–55.
7. Яновский Ф.И. Моделирование процессов взаимодействия радиолокационного сигнала с турбулизированным метеорологическим объектом // Вісн. КМУЦА. – 1998. – №1. – С. 122–134.
8. Battan L.J. Radar observation of the atmosphere // Univ. of Chicago Press. – Chicago, Illinois, 1973. – P. 250.
9. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 344 с.
10. Doviak R.J., Zrnicek D.S. Doppler radar and weather observations // Academic Press, inc., 1993. – 562 p.
11. Яновский Ф.И. Об использовании бортовой РЛС для оценки параметров турбулентности в облаках // Радиотехника и электроника. – 1974. – Т.19, №8. – С. 1763–1769.
12. Яновский Ф.И. Влияние движения радиолокатора на ширину спектра огибающей сигнала, отраженного от облака рассеивателей // Радиотехника и электроника. – 1977. – Т. 22, № 9. – С. 1972–1974.
13. Яновский Ф.И. Локализация опасных для авиации метеорологических явлений с борта воздушного судна. – К.: Знання України, 1991. – 28 с.
14. Yanovsky F.J., Ligthart L.P., Russchenberg H.W.J. Analysis of Transportable Atmospheric Radar possibilities for the remote sensing of dangerous meteorological phenomena // PIERS Proc., Cambridge. – Massachusetts, USA, 1997. – P.116.
15. Прокопенко И.Г., Яновский Ф.И. Комплексный алгоритм локализации зон опасной турбулентности // Статистические методы обработки информации в авиационных радиоэлектронных системах – К.: КМУГА, 1995. – С. 29–35.
16. Яновський Ф.Й. Метеонавігаційні радіолокаційні системи повітряних суден. – К.: НАУ, 2003. – 300 с.
17. Yanovsky F.J. Phenomenological Models of Doppler-Polarimetric Microwave Remote Sensing of Clouds and Precipitation // IEEE IGARSS. – Toronto, Canada. – 2002. – Vol. 3. – P. 1905–1907.
18. А.с. СССР. Устройство для радиолокационного определения опасных для полетов зон в облачности / И.М. Баранов, Ф.И. Яновський. – № 1173367. – Приоритет от 22.04.83, БИ №30, 1985.
19. А.с. СССР. Устройство для индикации турбулентности атмосферы / И.Г. Прокопенко, Э.А. Корнильев, Е.П. Кириченко, С.И. Матвеев. № 1334948. – Приоритет от 10.12.85.
20. Yanovsky F.J., Prokopenko I.G., Ligthart L.P. Adaptive algorithms for radar detection of turbulent zones in cloud and precipitation // IEEE Trans. AES. – 2003. – Vol. 39, №1. – P. 357–368.
22. Прокопенко И.Г., Яновский Ф.И. Комплексный алгоритм локализации зон опасной турбулентности // Статистические методы обработки информации в авиационных радиоэлектронных системах. – К.: КМУГА, 1995. – С. 29–35.

Стаття надійшла до редакції 23.09.03

Ю.А. Аверьянова, И.Г. Прокопенко, К.И. Прокопенко, Ф.И. Яновский

Алгоритмы обнаружения турбулентных зон метеорологическими радиолокаторами

Рассмотрены алгоритмы радиолокационного обнаружения турбулентных зон в облаках и осадках. Показаны преимущества адаптивных алгоритмов на примере некогерентных бортовых радиолокаторов с использованием экспериментальных измерений и статистического моделирования. Подтверждено, что адаптивные алгоритмы могут использоваться в когерентных и доплеровско-поляризметрических метеорологических радиолокаторах. Полученные результаты важны для обеспечения полетов в сложных метеорологических условиях.

Yu. A. Averyanova, I.G. Prokopenko, K.I. Prokopenko, F.J. Yanovsky

Algorithms of turbulence detection with weather radars

Algorithms of turbulence detection in the clouds and precipitation with radars were considered. Example of incoherent airborne radar with use of experimental data and statistical modeling was given to demonstrate advantages of adaptive algorithms. It was shown, that the adaptive algorithms can be used in combined Doppler and Polarization radars. It is important for flight when weather conditions are dangerous.